

⑬ BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

⑫ Offenlegungsschrift
⑪ DE 33 11 809 A1

⑳ Aktenzeichen: P 33 11 809.4
㉑ Anmeldetag: 31. 3. 83
㉒ Offenlegungstag: 11. 10. 84

⑤ Int. Cl. 3:
G 01 D 5/26
G 01 K 11/12
G 01 B 11/16
G 01 H 1/00
G 01 R 15/07
H 04 R 1/44

DE 33 11 809 A1

㉑ Anmelder:

Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der
angewandten Forschung e.V., 8000 München, DE

㉒ Erfinder:

Kist, Rainer, Dipl.-Phys. Dr., 7815 Kirchzarten-Burg,
DE; Kersten, Ralf Thomas, Prof. Dipl.-Phys. Dr., 7802
Gundelfingen-Wildtal, DE

Bibliothek
Bur. Ind. Eigendom
15 NOV. 1984

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑤4 Interferometrisches, eichbares Fabry-Perot-Sensorsystem mit doppelbrechendem
Monomode-Lichtwellenleiter

Es wird ein Sensorsystem beschrieben, das aus einem op-
tischen Fabry-Perot-Resonator als Sensorelement, einer
monochromatischen Lichtquelle und einer geeigneten Aus-
werteelektronik besteht. Der Fabry-Perot-Resonator ist aus
einem doppelbrechenden Lichtwellenleiter aufgebaut.
Dadurch ist es möglich, das sonst periodische, vorzeichenlo-
se Signal eines Fabry-Perots absolut einzueichen. Beispiel-
haft werden Temperatur-, Strom-, Magnet- oder Schall-
Sensoren dargestellt.

COPY

DE 33 11 809 A1

BEST AVAILABLE COPY

31078

3311809.

Fraunhofer-Gesellschaft
zur Förderung der angewandten Forschung e. V.
Leonrodstr. 54
8000 München 19

83/16460-IPM

Interferometrisches, eichbares Fabry-Perot-Sensorsystem mit
doppelbrechendem Monomode-Lichtwellenleiter

P A T E N T A N S P R O C H E

1. Optisches Sensorsystem zur Erfassung von von außen einwirkenden Zustandsgrößen, bestehend aus einer modulierbaren, monochromatischen oder polychromatischen Lichtquelle, einer einwelligen, polarisationserhaltenden Zuleitung, einem als Fabry-Perot-Resonator aufgebauten, doppelbrechenden Lichtwellenleiter, einem Fotodetektor und einer Auswertelektronik, dadurch gekennzeichnet, daß die Richtungserkennung der Veränderung der zu messenden Zustandsgröße eindeutig ist und eine absolute Eichung möglich ist.
2. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Lichtquelle aus einem Halbleiterlaser besteht, der in seiner Leistung mit fester oder variabler Frequenz moduliert wird.
3. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Lichtquelle aus einem Dauerstrichlaser besteht, dessen monochromatisches Licht mit Hilfe eines integriert optischen Schaltkreises phasenmoduliert wird.
4. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Lichtquelle bei mehreren diskreten und stabilen Lichtwellen emittiert.

COPY

5. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das Sensorsignal in Transmission oder Reflektion oder einer Kombination von beiden gewonnen wird.
6. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das Sensorelement aus einer doppelbrechenden Lichtleitfaser besteht, deren Endflächen senkrecht zur Faserachse stehen, optisch plan sind und mit hochreflektierenden dielektrischen oder metallischen Spiegeln versehen sind.
7. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das Sensorelement aus einem integriert optischen, doppelbrechenden Lichtwellenleiter besteht, dessen Endflächen senkrecht zur Wellenleiterachse stehen, optisch plan sind und mit hochreflektierenden dielektrischen oder metallischen Spiegeln versehen sind.
8. Vorrichtung nach Anspruch 6 und 7, dadurch gekennzeichnet, daß der Lichtwellenleiter aus einem elektrooptischen oder magneto-optischen oder akustooptischen Material besteht und daher besonders zur Messung von elektrischen oder magnetischen oder akustischen Feldern geeignet ist.
9. Vorrichtung nach Anspruch 6 und 7, dadurch gekennzeichnet, daß auf der Eingangsseite des Sensorelements ein Polarisator und auf der Ausgangsseite ein Analysator aus einem dielektrischen Schichtsystem aufgebracht sind oder durch die polarisationsabhängigen Eigenschaften der aufgetragenen Spiegel realisiert werden.
10. Vorrichtung nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß die doppelbrechende Lichtleitfaser einen metallischen Mantel besitzt, der von einem Strom durchflossen werden kann.

Die Erfindung betrifft ein Sensorsystem, das zur hochpräzisen Messung von auf ein Sensorelement einwirkenden Zustandsgrößen geeignet ist. Ein Ausführungsbeispiel zeigt Figur 1. Das Sensorsystem besteht in diesem Beispiel aus einem Halbleiterlaser (1), der nur bei einer einzigen Wellenlänge emittiert. Die Stabilisierung dieser Wellenlänge erfolgt durch Kontrolle des Injektionsstromes (2) und einer Temperaturstabilisierung (3). Beide Stabilisierungen werden von einer gemeinsamen Elektronik (4) kontrolliert, die von der Auswerteelektronik (5) des Gesamtsystems kontrolliert wird. Das vom Halbleiterlaser (1) abgestrahlte Licht wird über eine geeignete Optik (6), in die auch eine optische Richtungsleitung integriert werden kann, in eine einwellige, polarisationserhaltende Zuleitungsfaser (7) eingekoppelt. Das Licht gelangt so zum eigentlichen Sensorelement (9), das aus einem doppelbrechenden Lichtwellenleiter aufgebaut ist und einen Fabry-Perot-Resonator darstellt. In Abhängigkeit von der von außen wirkenden Zustandsgröße ändert sich die Transmission und Reflexion dieses Sensorelementes. Diese Eigenschaften werden später näher beschrieben. Im vorliegenden Beispiel erfolgt die Auswertung in Reflexion: Das vom Sensorelement (9) reflektierte Licht wird über die Zuleitungsfaser (7), einen polarisationserhaltenden Richtkoppler (8) den beiden Detektoren (10) und (11) zugeführt. Vor diesen beiden Detektoren befindet sich ein geeignetes optisches Element (12), z. B. Wollaston-Prisma, das das von der polarisationserhaltenden Lichtleitfaser (13) ankommende Licht in zwei zueinander senkrecht polarisierte Wellen aufteilt. Die von den beiden Fotodetektoren (10) und (11) detektierte Lichtleistung wird über die beiden Verstärker (14) und (15) der Auswerteelektronik (5) zugeführt. Um auch geringe Lichtleistungsschwankungen des Halbleiterlasers zu kompensieren wird das aus dem Richtkoppler (8) austretende Licht über eine weitere Faser (16) einem dritten Detektor (17) zugeleitet und über den Verstärker (18) in der Auswerteelektronik (5) verarbeitet.

Das Sensorelement (9) besteht aus einem doppelbrechenden Lichtwellenleiter, dessen senkrecht zur Wellenleiterachse stehenden Endflächen mit hochreflektierenden Spiegeln versehen sind, um dadurch einen Fabry-Perot-Resonator herzustellen.

Die Kombination des Prinzips des Fabry-Perots mit dem Konzept des doppelbrechenden Lichtwellenleiters stellt das Kernstück der vorliegenden Erfindung dar und bietet folgende charakteristischen Vorteile: die Polarisationserhaltung erlaubt den parallelen Betrieb zweier Resonatoren in einem Lichtwellenleiter ohne Energieaustausch zwischen den in den beiden Resonatoren vielfach reflektierten orthogonalen Moden (HE_{x11} und HE_{y11}). Dieses System zeichnet sich außerdem durch hohe Gleichtaktunterdrückung aus, da beide Resonatoren auf etwaige äußere Einflüsse (Ausnahme: Temperatur) in gleicher Weise reagieren.

Die Phasenänderung ($d\phi_x, d\phi_y$) pro Hin- und Rückreflexion (round trip) in einem solchen Doppelresonator ist bei konstanter Lichtwellenlänge λ gegeben durch

$$d\phi_x = \frac{4\pi L}{\lambda} dn_x + n_x \frac{nL}{L} ,$$

$$d\phi_y = \frac{4\pi L}{\lambda} dn_y + n_y \frac{dL}{L} .$$

L ist die Länge des Fabry-Perot-Resonators, n_x und n_y sind die Brechzahlen bezüglich der Hauptachsen x und y des doppelbrechenden Lichtwellenleiters.

$$L = L_0 (1 + \alpha T), L_0 = L (T = 0^\circ \text{C})$$

$$n_x = n_{ox} (1 + \beta_x T), n_{ox} = n_x (T = 0^\circ \text{C})$$

$$n_y = n_{oy} (1 + \beta_y T), n_{oy} = n_y (T = 0^\circ \text{C})$$

$$n_x - n_y = \Delta n$$

Dabei ist α der Längenausdehnungskoeffizient des Wellenleiters (z. B. Quarz: $\alpha \approx 6 \cdot 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$), $\beta_{x,y}$ ist der Temperaturkoeffizient der Brechzahl in Richtung der Wellenleiterhauptachsen (typischer Wert: $\beta \approx 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$). Die Phasenänderung im Fabry-Perot-Resonator läuft also wesentlich über die Temperaturabhängigkeit der Brechzahl, sofern - wie hier angenommen - das Sensorelement aus Quarzglas besteht, also z. B. einer Lichtleitfaser. Die Phase ϕ geht in die Phasenfunktion

$$f(\phi) = \left[1 + \left(\frac{2F}{\pi} \right)^2 \sin^2 \left(\frac{\phi}{2} \right) \right]^{-1}$$

ein, mit der die Transparenz t des Fabry-Perot-Resonators berechnet wird:

$$t = t_{\max} \cdot f(\phi).$$

Dabei ist $F = \frac{\pi r}{1 - r^2}$ (r^2 = Reflexionskoeffizient der hier als gleich angenommenen Spiegel) die Finesse und t_{\max} die (verlustabhängige) Maximaltransparenz des Resonators.

Figur 2 zeigt den typischen Verlauf solcher Transparenzkurven bei Veränderung der Temperatur für verschiedene Werte des Verlustfaktors λ des Resonators.

Nimmt man beispielhaft für das Sensorelement eine doppelbrechende Faser an mit den Hauptachsen x und y , längs deren sich die orthogonalen Fundamentalmode HE_{x11} und HE_{y11} mit den etwas verschiedenen Phasengeschwindigkeiten, $v_x = c/n_x$ und $v_y = c/n_y$, ausbreiten, wobei c die Vakuumlichtgeschwindigkeit ist. Bei Einstrahlung einer linear polarisierten Welle in x - oder y -Richtung wird nur die HE_{x11} oder die HE_{y11} -Mode angeregt, die wegen der Polarisationserhaltung stets längs der jeweiligen Hauptachse reflektiert wird, ohne Energie mit der anderen Welle auszutauschen.

Bei Einstrahlung einer linear polarisierten Welle unter $\rho = 45^\circ$ zu den Hauptachsen ändert sich wegen der relativen Phasenverschiebung zwischen den beiden orthogonalen Moden die Polarisation längs der Faser innerhalb einer Schwebungslänge Λ über rechts zirkular ($\Delta\phi = \pi/2$), linear, ($\Delta\phi = \pi$), links zirkular ($\Delta\phi = \frac{3}{2}\pi$) zu linear ($\Delta\phi = 2\pi$), mit elliptischer Polarisation als Zwischenzuständen. Diese Verhältnisse sind in Fig. 3 schematisch dargestellt. Wird linear polarisiertes Licht unter einem beliebigen Winkel ρ z. B. gegen die x-Hauptachse in den Resonator eingestrahlt, so gilt nach Fig. 4 folgendes: die Komponenten der Feldstärkeamplituden sind

$$E_x = E_0 \cos \rho$$

$$E_y = E_0 \sin \rho$$

$$I_y = E_y^2 = I_0 \sin^2 \rho$$

$$I_0 = E_0^2$$

$$I_x + I_y = I_0$$

Die Komponenten I_x und I_y können mit einem in Richtung der Hauptachsen zu orientierenden Analysator oder einem unter 45° orientierten Wollastonprisma (12) ermittelt werden. Aus dem Verhältnis I_y/I_x folgt für den Einstrahlwinkel ρ

$$\rho = \arctg \sqrt{I_y/I_x}$$

Andererseits kann somit über den Winkel ρ ein gewünschtes Intensitätsverhältnis I_y/I_x eingestellt werden, für $\rho = 60^\circ$ wird z. B. $I_y/I_x = 3$.

Bei Variationen der Temperatur um $t_x(T)$ und $t_y(T)$ gemäß der Gleichung $t_x = t_{\max} f(\phi_x)$ bzw. $t_y = t_{\max} f(\phi_y)$ erhält man den in Fig. 5 dargestellten Verlauf.

Ein in Transparenz messender Detektor (ohne Analysator) ergibt dann das resultierende Signal

$$I(T) = I_x(T) + I_y(T).$$

Dieses Signal hat zwei wesentliche Eigenschaften:

- a) Es wechseln große Maxima (I_y^{\max}) mit kleinen Maxima (I_x^{\max}) ab. Über einen geeigneten Schwellenwertdiskriminator kann somit die Richtung der Änderung von T bestimmt werden.
- b) Der Abstand zwischen benachbarten Maxima ist eine monoton zunehmende (bzw. abnehmende) Funktion von T. Die Stärke dieser Funktion ist abhängig von der Stärke der Doppelbrechung, ausgedrückt durch Λ (starke Doppelbrechung $\hat{=}$ kleinem Λ) des Resonators. Je nach der Größe von Λ haben die Signale $I_x(T)$ und $I_y(T)$ einen etwas verschiedenen freien Spektralbereich $\Delta\nu = c/2nL$. Dadurch entsteht eine mehr oder weniger große Schwebungslänge Λ_T nach der die Signale I_x und I_y wieder gleiche Phase bezüglich T erreichen. Die Folge der Maxima von $I_x(T)$ und $I_y(T)$ gleicht somit einer Form, die entsteht, wenn man zwei Kämme mit leicht verschiedenem Zahnabstand (freier Spektralbereich $\Delta\nu$) und dem Zahnhöhenverhältnis I_y/I_x übereinanderlegt.

Neben dem Einsatz dieses Konzepts als Temperatursensor ist auch die Anwendung für andere Zustandsgrößen prinzipiell möglich. Dies gilt insbesondere für einen Stromsensor mit metallbeschichteter doppelbrechender Faser, bei der die Joule'schen Verluste in der Beschichtung in eine Erwärmung der Faser umgesetzt werden, womit der Stromsensor letztlich als Temperatursensor betrieben wird.

Die Kombination des erfindungsgemäß vorgeschlagenen Sensorsystems mit speziell dotierten bzw. präparierten doppelbrechenden Lichtwellenleitern erlaubt z. B. die Konzipie-

rung eines Magnetfeldsensors mit geeignetem anisotrop magneto-
 optischem Kernmaterial, so daß eine für eine Absoluteichung
 ausreichende Abhängigkeit $\Delta n(B) = n_x(B) - n_y(B)$ der Doppel-
 brechung vom zu messenden Magnetfeld B entsteht. Das eigentliche
 Resonatorsignal, also die Folge der Maxima I_x^{\max} und I_y^{\max} ,
 wird durch magnetostruktive Kopplung des Resonators an eine
 Nickel-Beschichtung bzw. an eine metallisches Glas erreicht.

Nach ähnlichen Gesichtspunkten wird ein Zugsensor mit stark
 elastooptischem Kernmaterial vorgesehen, bei dem die unter
 der Zugspannung σ auftretende Längenänderung zur Signaler-
 zeugung (Durchlaufen der Maxima I_x^{\max} und I_y^{\max}) und die Ab-
 hängigkeit $\Delta n(\sigma)$ der Doppelbrechung zur Absoluteichung benutzt
 wird. Wie bei allen übrigen vorgeschlagenen Sensoren wird auch
 hier die Bestimmung der Richtung der Parameteränderung über
 das Verhältnis $I_x^{\max}/I_y^{\max} \neq 1$ bewerkstelligt.

Schließlich wird noch ein Schallwellensensor (Hydrophon) vor-
 geschlagen. Dabei wird eine durch Biegung induzierte Änderung
 der Doppelbrechung eines geeignet gewählten Lichtwellenlei-
 ters genutzt. Diese Biegung wird erzeugt, wenn die Schall-
 welle den frei (an einem Ende) eingespannten oder auf eine
 geeignete Membran gebondeten Resonator zu mechanischen
 Schwingungen anregt. Dabei ist die azimutale Lage des Resona-
 tors (Hauptachse) auf maximale Änderung der Wellenleiter-
 Doppelbrechung bei vorgegebener Einfallrichtung der Schall-
 wellen zu orientieren. Wegen der sehr geringen Masse des
 Resonators, speziell beim Einsatz einer Lichtleitfaser, lie-
 gen die Grenzfrequenzen eines solchen schwingenden Systems
 sehr hoch. Gewünschte Dämpfungseigenschaften sowie die Wahl
 des empfindlichen Frequenzbereichs können über eine geeignete
 Beschichtung des doppelbrechenden Wellenleiters eingestellt
 werden.

Literatur

I.P. KAMINOW, "Polarization in fibers", Laser Focus, 80 - 84 (June 1980).

W. EICKHOFF, "Temperature sensing by mode-mode interference in birefringent optical fibers", Opt. Lett., 6, 204 - 206 (1981).

R. KIST, W. SOHLER, "Fiber Optic Spectrum Analyzer", IEEE Journal of Lightwave Technology, 1 (1983)1.

R. KIST, S. DROPE, "Fiber Optic Fabry Perot Resonator as Temperature Sensor and Optical Spectrum Analyzer", Proceedings of the SPIE Technical Symposium East 1983, April 4 - 8, Arlington, USA (1983).

- 10 -
- Leerseite -

Nummer:

Cl. 3:

Anmeldetag:

Offenlegungstag:

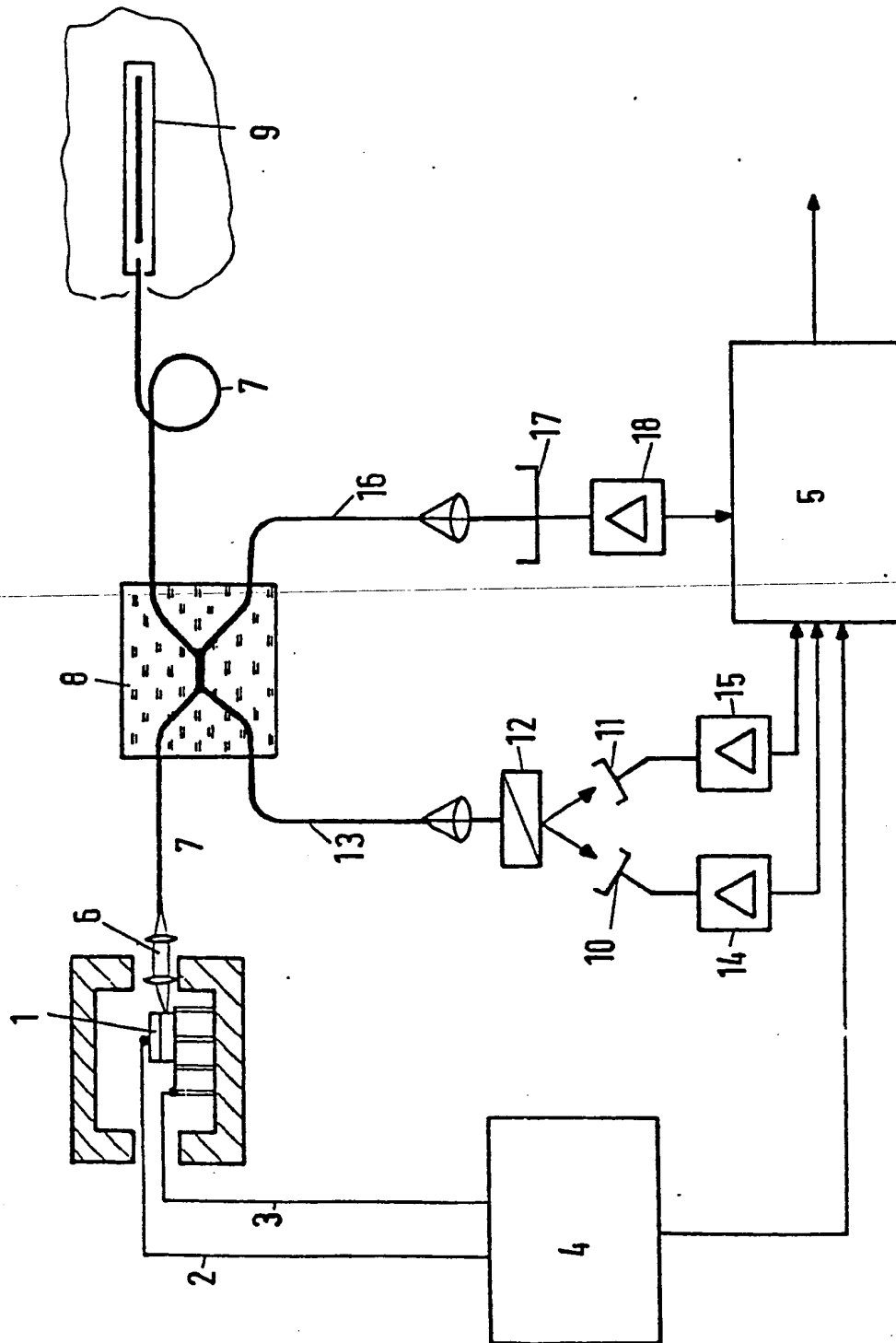
33 11 809

G 01 D 5/26

31. März 1983

11. Oktober 1984

- 15 -



- 1A -

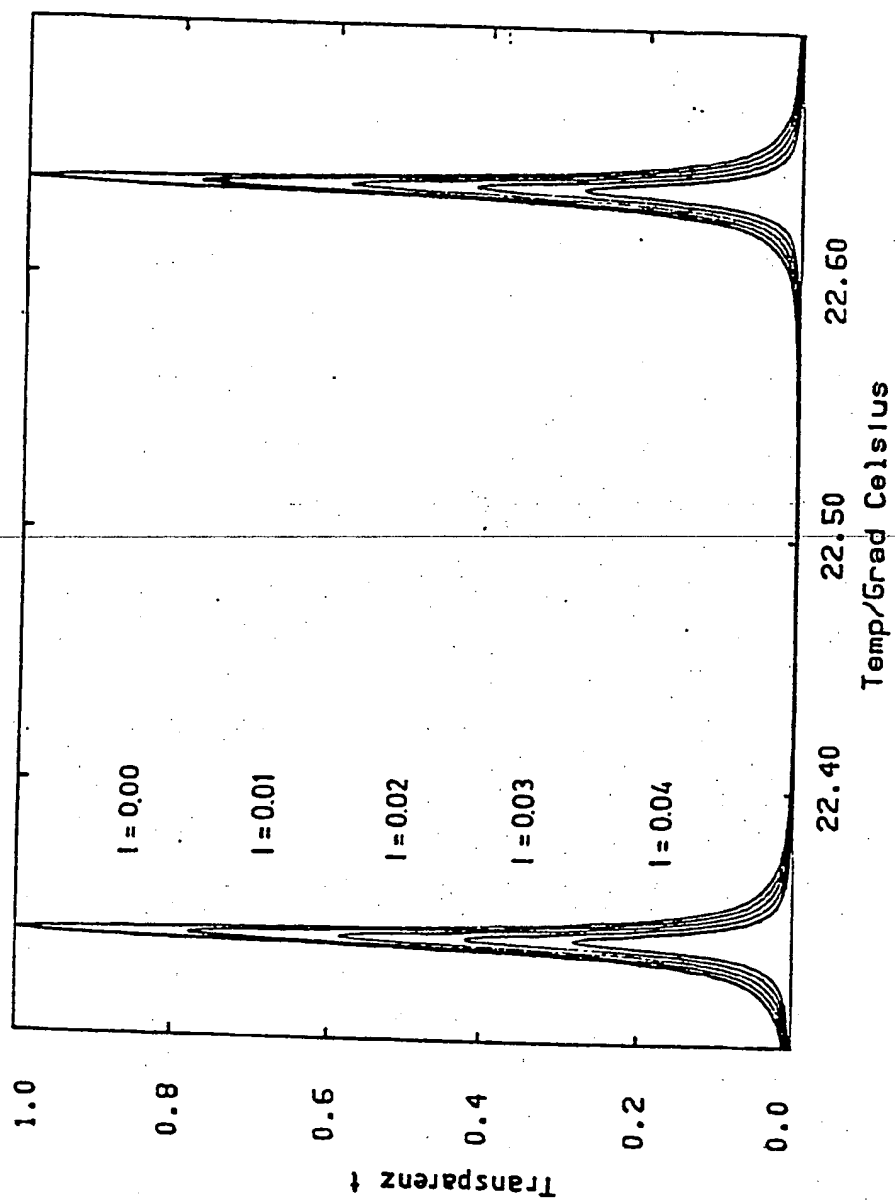


Fig. 2

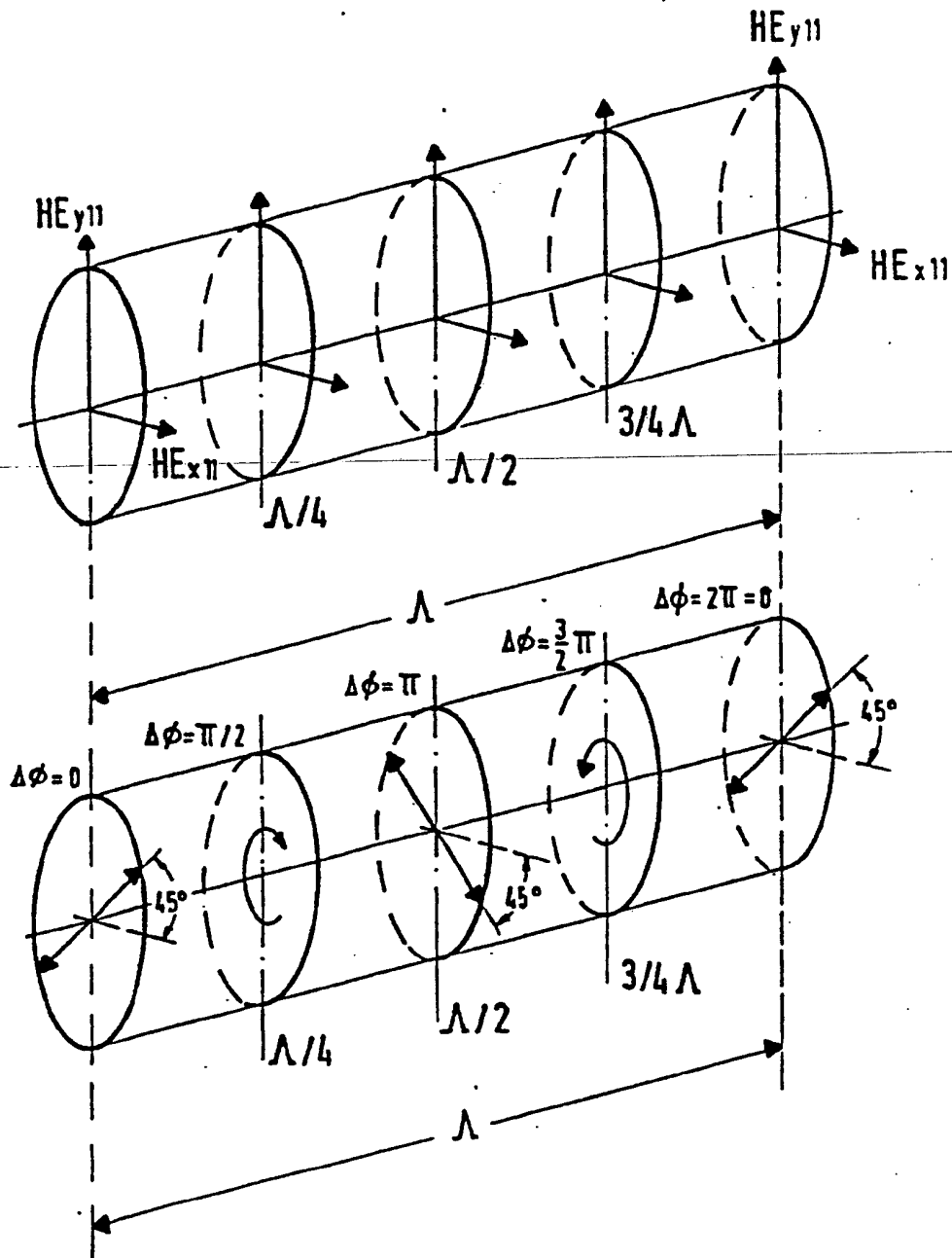


Fig. 3

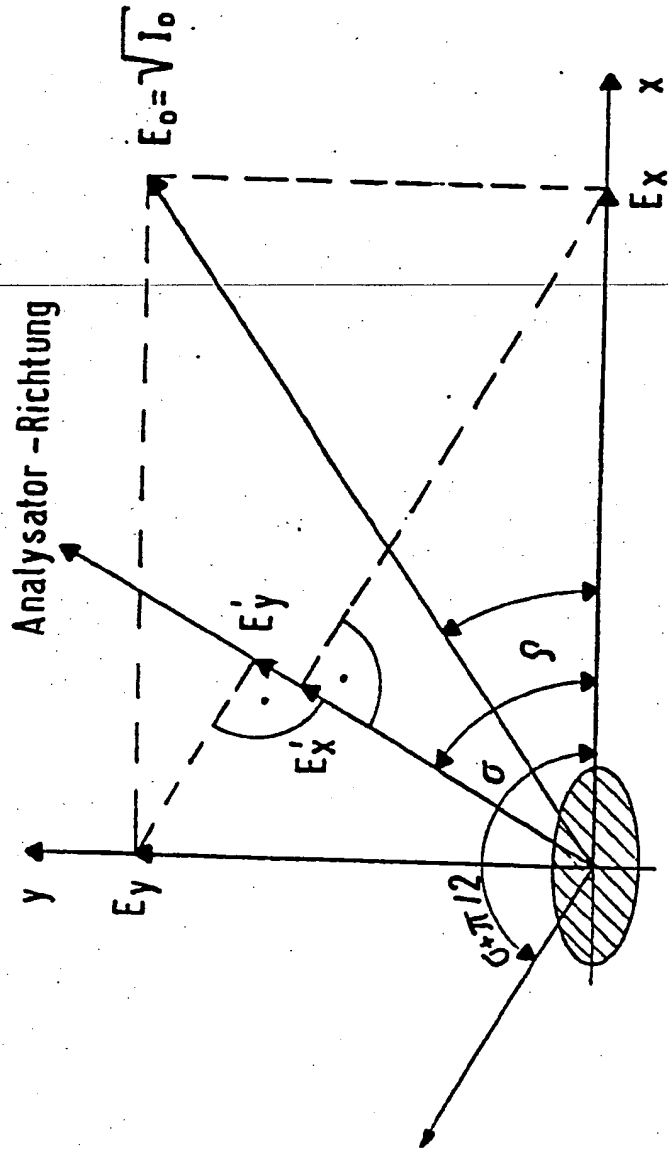


Fig.4

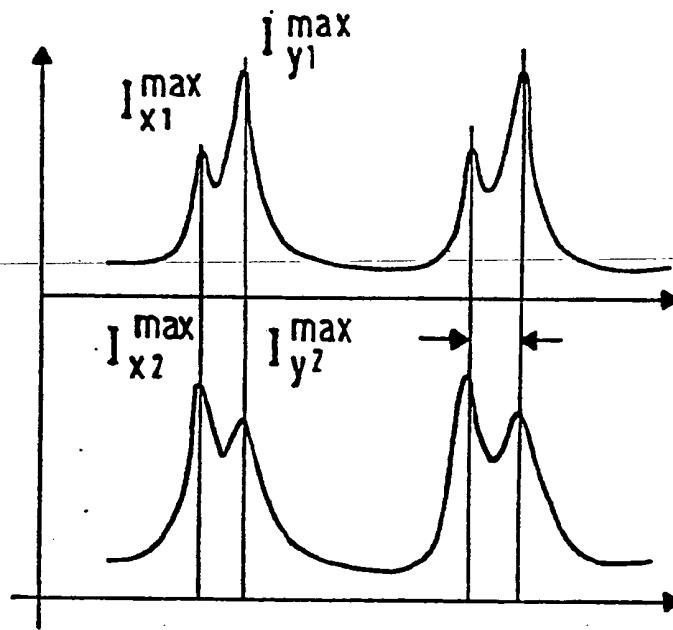


Fig. 5

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☐ FADED TEXT OR DRAWING
- ☐ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☐ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☒ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☐ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.

THIS PAGE BLANK (USPTO)